بررسی مُرفولوژی لایه‌های اکسیدی زمان کوتاه در مذاب آلومینیم خالص*

بهزاد نایبی[۱]	مهدی دیواندری[۲]	سید امیر آذرمهر[۳]

چکیده

فلز آلومینیم نسبت به واکنش اکسایش بسیار حساس است، به‌گونه‌ای که هر گاه سطح مذاب آن در معرض هوا قرار گیرد به‌سرعت اکسید شده و یک لایه‌ی اکسیدی بر روی آن تشکیل می‌شود. لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده در زمان بارریزی دارای ضخامتی کم و سطوحی چین‌خورده است. در نتیجه‌ی تلاطم مذاب و تاخوردن لایه‌ی اکسیدی بر روی آن، لایه‌ی اکسیدی دوتایی تشکیل می‌شود. ورود لایه‌های اکسیدی دوتایی درون مذاب یکی از مهم‌ترین عوامل تشکیل عیوب ریخته‌گری است. در پژوهش حاضر، شرایط تشکیل لایه‌ی اکسیدی دوتایی به‌روش ساندویچ اکسید- فلز- اکسید بررسی شده است. سطوح تماس حباب‌هایی که حین انجام آزمایش درون مذاب به دام افتاده‌اند، برای مطالعه‌ی خواص لایه‌ی اکسیدی جدید به‌وسیله‌ی SEM بررسی شدند. اندازه‌گیری ضخامت چین‌خوردگی لایه‌های اکسیدی در آلومینیم خالص نشان داد که ضخامت لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه در آلومینیم خالص کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر است.

واژه‌های کلیدی لایه‌ی اکسیدی، آلومینیم خالص، اکسایش زمان کوتاه، ساندویچ اکسید- فلز- اکسید، تاخوردگی، چروکیدگی.

An Investigation into the Morphology of Short-Time Oxide Films in Molten Pure Aluminum

B. Naebi	M. Divandari	S. A. Azarmehr

Abstract

Aluminum is very sensitive to oxidation reactions. If a fresh surface of melt is exposed to air, it oxidizes quickly and an oxide layer covers the melt surface. New oxide films formed in a very short time during casting are thin and folded. The metal surface can be folded and create a double-oxide film as a result of the melt turbulence. The entrance of this double-oxide film into the melt is one of the most important reasons for the formation of crack-like defects during casting. In this work, the characteristics of these new oxide films have been investigated based on the oxide-metal-oxide sandwich technique. To study the futures of new oxide film, the contact area between two adjacent and entrapped bubbles have been examined using scanning electron microscope (SEM). Results showed that the short time oxide films formed in pure aluminum have a thickness less than 100 nanometer.

Key Words Oxide film; Pure aluminum; Short time oxidation; Oxide-metal-oxide sandwich; Folded; Wrinkled.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۱۰/۱۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۹/٦ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) کارشناس ارشد، گروه ریخته‌گری، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) دانشیار، گروه ریخته‌گری، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

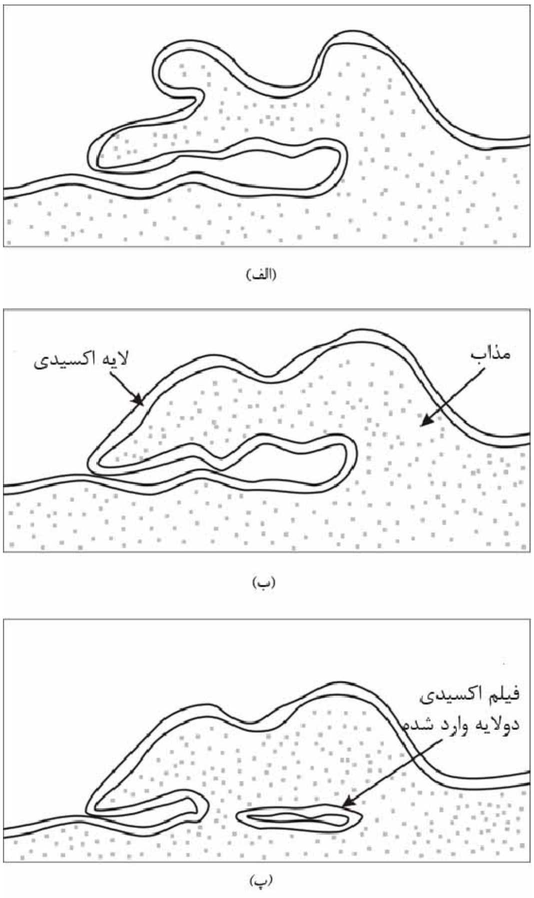
(۳) نویسنده‌ی مسئول: کارشناس ارشد، گروه ریخته‌گری، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه

بخش اعظم تحقیقات در زمینه‌ی اکسایش آلومینیم مذاب و آلیاژهای آن بر روی مذاب ساکن و در مدّت زمان طولانی انجام شده است. با این‌حال، مذاب در شرایط ریخته‌گری جریان داشته و به‌سرعت منجمد می‌شود. بر اساس گزارش‌های موجود در باره‌ی اکسایش دراز مدّت آلومینیم مذاب در حالت سکون، سطح آزاد مذاب به‌محض قرارگیری در معرض هوا اکسید می‌شود. در این فرایند، اکسید آلومینیم بی‌شکل (آمورف) بر روی سطح مذاب تشکیل می‌شود. آلومینای بی‌شکل پس از مدّتی به آلومینای بلورین نوع گاما تبدیل می‌شود، و این نوع آلومینا پس از طی یک دوره‌ی نهفتگی به آلومینای بلورین نوع آلفا تبدیل می‌شود. به‌دلیل کاهش سرعت نفوذ اتم‌ها در آلومینای بی‌شکل و نوع گاما، لایه‌هایی از این نوع خاصیت حفاظتی داشته و ادامه‌ی اکسایش را کند می‌کنند. با این‌حال، تبدیل فازی آلومینای گاما به آلومینای آلفا با کاهش حجم و تشکیل ترک در لایه‌ی اکسیدی همراه است. بنابراین، آلومینای آلفا ویژگی حفاظتی ضعیف‌تری نسبت به آلومینای بی‌شکل و گاما خواهد داشت [1-3].

ارسال حباب درون مذاب یکی از روش‌هایی است که برای بررسی اکسایش آلیاژهای مختلف در شرایط ریخته‌گری و در محیط‌های متفاوت استفاده شده است [4-8]. وایت‌من و فِری در سال ۱۹۸۳ با وارد کردن حباب دی اکسید کربن درون مذاب آلومینیم نشان دادند که نرخ اکسایش مذاب ساکن بسیار آرام‌تر از مذاب متلاطم است [4].

در تحقیقی که بر روی سطوح شکست قطعات ریخته شده به‌شکل متلاطم انجام گرفته است، حضور لایه‌های اکسیدی در مقطع شکست اثبات شده است. این لایه‌ها سطوح چین خورده داشته و ضخامت‌های آن‌ها متفاوت است. لایه‌های نازک‌تر که حین بارریزی تشکیل و به درون مذاب وارد شده‌اند، به‌نام لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه یا جدید شناخته می‌شوند، ولی لایه‌های ضخیم‌تر از نوع اکسیدی هستند که در فرایند تهیه‌ی ذوب (معمولاً درون کوره) تشکیل شده و به لایه‌های اکسیدی زمان طولانی یا کهنه معروفند [9-11]. مطابق با نتایج تحقیقات کَمبل، وقتی مذاب تحت تنش‌های مکانیکی ناشی از تلاطم قرار می‌گیرد، ممکن است لایه‌ی اکسید سطحی بر روی خود تاخورده و وارد مذاب شود. با ورود لایه‌ی سطحی درون مذاب، سطح آزاد جدید مذاب به‌سرعت اکسید شده و مجدداً تحت تنش‌های مکانیکی ناشی از تلاطم مذاب قرار می‌گیرد. به‌این ترتیب فرایند تاخوردن و ورود لایه‌ی اکسیدی درون مذاب مدام تکرار می‌شود. از آنجا که میان دو لایه‌ی اکسیدی اتصال اتمی وجود ندارد، لایه‌ی اکسیدی دولایه می‌تواند نقش ترک بالقوه را بازی کند (شکل ۱) [12,13].

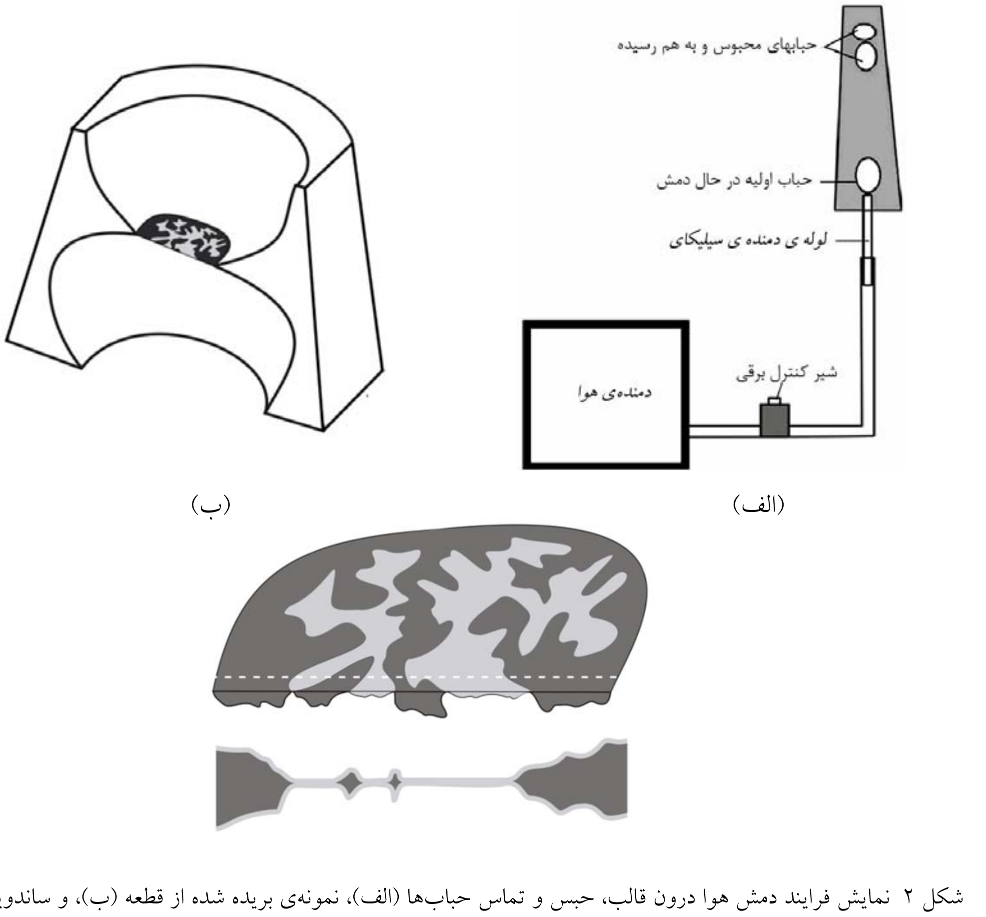


شکل ۱ نمایش ورود عیب لایه‌ی ااکسیدی دولایه، الف) تشکیل موج متلاطم در اثر تلاطم سطحی که موجب تماس سطوح غیر ترشونده‌ی لایه‌ی اکسیدی شده است (ب)، پ) لایه‌ی کسیدی دولایه در توده‌ی مذاب به‌عنوان ترک غوطه‌ور عمل می‌کند [۸].

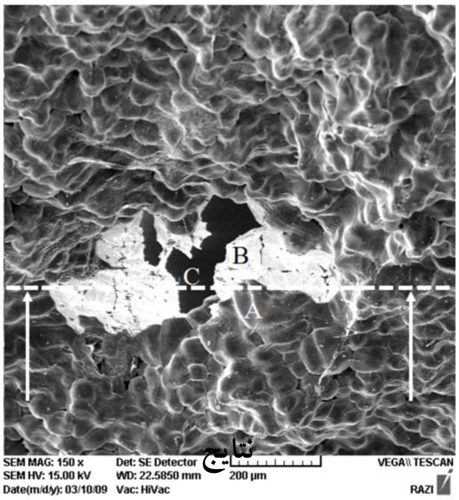
استفاده از ساندویچ اکسید– فلز– اکسید روش مناسبی برای بررسی مُرفولوژی لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه است که توسط یکی از مؤلفین این مقاله ارائه شده است [14]. این روش بر اساس فرستادن حباب درون مذاب طراحی شده است، ولی محل تماس دو حباب هوا بررسی می‌شود. در این روش، مُرفولوژی سطحی لایه، ضخامت لایه‌ی اکسیدی و حتی نحوه‌ی انجماد مذاب و تشکیل فازهای مختلف بررسی می‌شوند [۱۹–14].

روش تحقیق

مذاب آلومینیم خالص تجاری در دمای ۸۰۰ °C تهیه و به‌صورت کف‌ریز دورن محفظه‌ی قالب ریخته شد. همزمان با ریختن مذاب، حباب‌های هوا از طریق لوله‌ی سیلیکایی از کف قطعه درون مذاب فرستاده شد. شیب انجماد در این آزمون از بالا به پایین قطعه بوده است، بنابراین حباب‌های هوای فرستاده شده درون قطعه به دام افتادند. پس از انجماد کامل قطعه، سطح تماس حباب‌های به‌هم رسیده به‌عنوان نمونه‌ی ساندویچ اکسید– فلز– اکسید از قطعات جدا شدند و به‌وسیله‌ی میکروسکپ الکترونی روبشی بررسی شدند. در شکل (۲– الف)، دستگاه دمش حباب درون قالب نشان داده شده است. محل تشکیل ساندویچ اکسید– فلز– اکسید در سطح تماس دو حباب هوا نیز در شکل (۲– ب) مشاهده می‌شود.



شکل ۲ نمایش فرایند دمش هوا درون قالب، حبس و تماس حباب‌ها (الف)، نمونه‌ی بریده شده از قطعه (ب)، و ساندویچ اکسید– فلز– اکسید از نمای بالا به‌همراه نمای جانبی از مقطع مشخص شده در آن (پ).



(الف)



(ب)

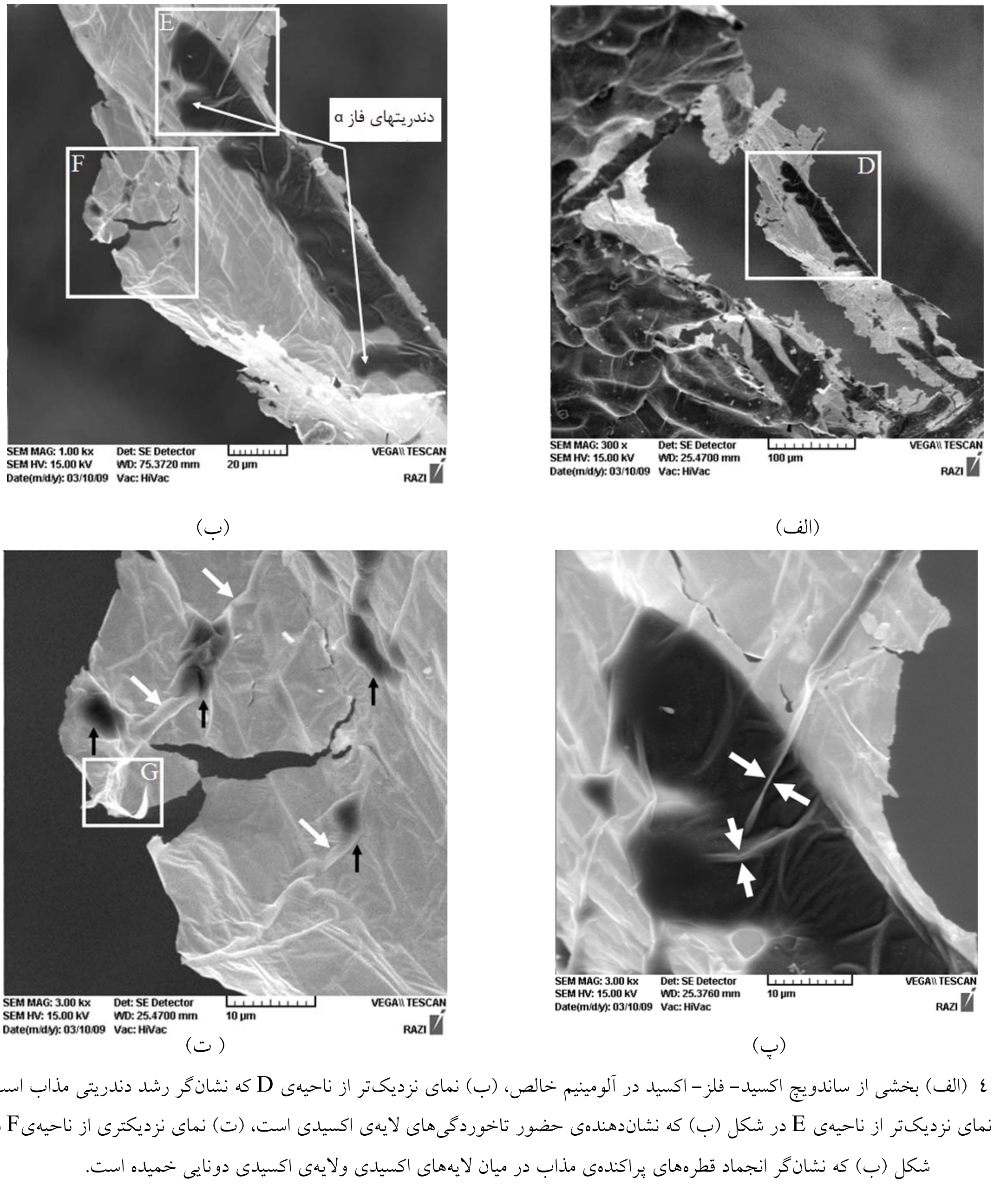
شکل ۳ (الف) بخشی از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید تشکیل شده در سطح تماس حباب‌های به‌هم رسیده در مذاب آلومینیم خالص، (ب) نمایش نمای جانبی از مقطع مشخص شده در سطح تماس حباب‌های مجاور

نتایج

شکل (۳- الف) یک نمونه از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید که در آلومینیم خالص تشکیل شده است را نشان می‌دهد. بر اساس گزارش‌های قبلی [19-14]، لایه‌ی اکسیدی به‌قدری نازک است که ساختار دندریتی مذاب زیر آن کاملاً قابل مشاهده است. در این شکل، سه ناحیه‌ی متمایز با کدهای A، B و C مشخص شده‌اند. در ناحیه‌ی A، دندریت‌های مذاب محبوس در میان سطوح حباب‌ها که لایه‌ی اکسیدی روی آن کشیده شده است، قابل مشاهده است. ناحیه‌ی B (سفید رنگ) محل نزدیک شدن سطوح حباب‌ها (لایه‌های اکسیدی) به یکدیگر است. ناحیه‌ی C بخشی از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید است که در نتیجه‌ی ارتعاشات ناشی از جداسازی نمونه خرد شده و فرو ریخته است. به‌دلیل عدم امکان تمرکز اشعه‌ی الکترونی، این نواحی به‌رنگ تیره دیده می‌شوند. شکل (۳- ب) منطقه‌ی برش خورده در شکل (۳- الف) را از نمای مشخص شده نشان می دهد.

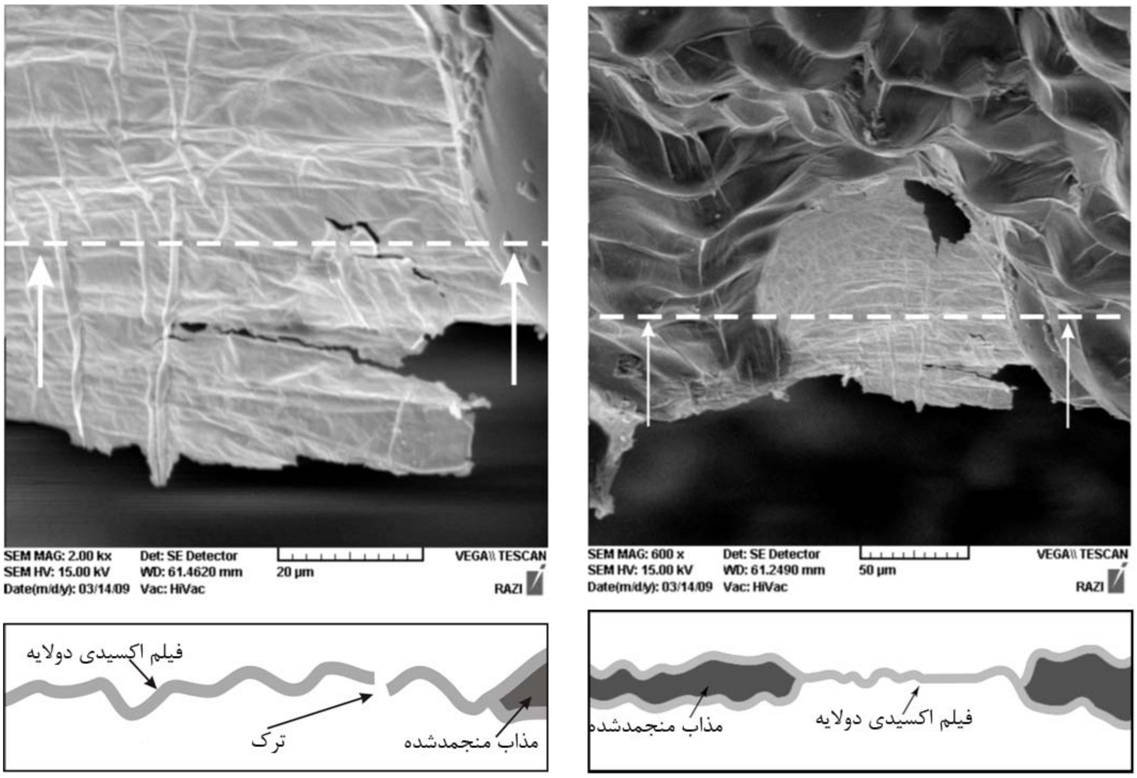
شکل (٤- الف) بخش دیگری از سطح تماس دو حباب به‌هم رسیده در آلومینیم خالص را نشان می‌دهد. در این تصویر، دندریت‌های منجمد شده در زیر لایه‌ی اکسیدی در ناحیه‌ی غنی از مذاب مشاهده می‌شوند. تخریب ساندویچ اکسید- فلز- اکسید، ترک خوردن لایه‌ی اکسیدی و نزدیک شدن لایه‌های اکسیدی به یکدیگر نیز در این تصویر دیده می‌شوند. افزون بر این، در ناحیه‌ی D در شکل (٤- الف) بازوی دندریتی منفردی دیده می‌شود که ظاهراً در نتیجه‌ی کمبود مذاب در این ناحیه از توده‌ی مذاب جدا افتاده و به‌تنهایی منجمد شده است. شکل (٤- ب)، ناحیه‌ی D در شکل (٤- الف) را با بزرگ‌نمایی بالاتر نشان می‌دهد. انجماد شاخه‌ای مذاب محبوس شده در میان لایه‌های اکسیدی و دندریت‌های آلومینیم خالص در این شکل به‌وضوح قابل مشاهده هستند. در شکل (٤- پ)، ناحیه‌ی E در شکل (٤- ب) در بزرگ‌نمایی بالاتر نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، چین‌خوردگی‌های زیادی در لایه‌ی اکسیدی به‌وجود آمده‌اند. ضخامت چین‌خوردگی‌ها در این تصویر (مشخص شده با فلش) را می‌توان در محدوده‌ی ۰/۲ تا

۰/۸ میکرومتر تخمین زد. در شکل (٤- ت)، ناحیه‌ی F در شکل (٤- ب) با بزرگ‌نمایی بالاتر مشاهده می‌شود. با دقّت در این شکل می‌توان قطره‌هایی از مذاب در میان لایه‌ی اکسیدی که به‌صورت پراکنده به دام افتاده و به‌تنهایی منجمد شده‌اند را مشاهده کرد. همان‌طور که دیده می‌شود، چین‌خوردگی‌هایی که در امتداد نواحی پر تنش قطره‌های مذاب (مشخص شده با فلش سفید) ایجاد شده‌اند نسبت به سایر چین‌خوردگی‌های موجود در نواحی روشن تصویر ضخامت بیش‌تری دارند. حالت خمیده‌ی لایه‌ی دوتایی در ناحیه‌ی G از ویژگی‌های جالب این شکل است. افزون بر موارد ذکر شده، یکی از مشخصه‌های ساندویچ اکسید- فلز- اکسید حضور ترک در سطح آن است که به‌وضوح در این شکل دیده می‌شود.



(الف) (ب) (پ) (ت)

شکل ٤ (الف) بخشی از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید در آلومینیم خالص، (ب) نمای نزدیک‌تر از ناحیه‌ی D که نشان‌گر رشد دندریتی مذاب است، (پ) نمای نزدیک‌تر از ناحیه‌ی E در شکل (ب) که نشان‌دهنده‌ی حضور تاخوردگی‌های لایه‌ی اکسیدی است، (ت) نمای نزدیکتری از ناحیه‌یF در شکل (ب) که نشان‌گر انجماد قطره‌های پراکنده‌ی مذاب در میان لایه‌های اکسیدی ولایه‌ی اکسیدی دونایی خمیده است.



(الف) (ب)

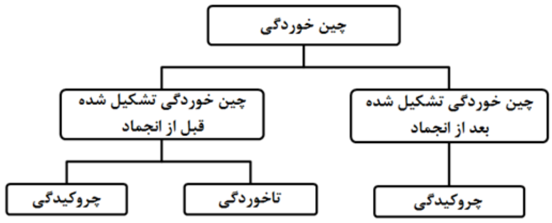
شکل ٥ (الف) حضور چروکیدگی بر روی سطح دندریت‌های مذاب محبوس شده در لایه‌ی دوتایی و نمایی از ناحیه‌ی برش خورده، (ب) بزرگ‌نمایی بالاتر از ناحیه‌ی روشن در تصویر (الف) و نمایی از ناحیه‌ی برش‌خورده که نشان‌گر چین‌خوردگی وسیع لایه‌ی اکسیدی است.

بخش دیگری از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید در شکل (٥- الف) نشان داده شده است. دندریت‌های فلز منجمد شده (نواحی تیره) در زیر لایه‌ی اکسیدی دیده می‌شوند. ناحیه‌ی روشن مرکزی نیز منطقه‌ای است که در آن لایه‌های اکسیدی به‌دلیل کمبود مذاب به یک‌دیگر نزدیک شده‌اند. چروکیدگی‌هایی بر روی سطح جانبی اکثر دندریت‌ها به‌چشم می‌خورد که با فلش نشان داده شده‌اند. افزون بر این، ریزش ساندویچ اکسید- فلز- اکسید در برخی از مناطق این شکل نیز دیده می‌شود. شکل (٥- ب) ناحیه‌ی روشن موجود در شکل (٥- الف) را در بزرگ‌نمایی بالاتر نشان می‌دهد. سطح لایه‌ی اکسیدی در این ناحیه به‌شدّت چین خورده است. اگر چه که این چین‌خوردگی‌ها چندان خشن به‌نظر نمی‌آیند، امّا ضخامت آن‌ها به ۱ میکرومتر نیز می‌رسد.

بحث

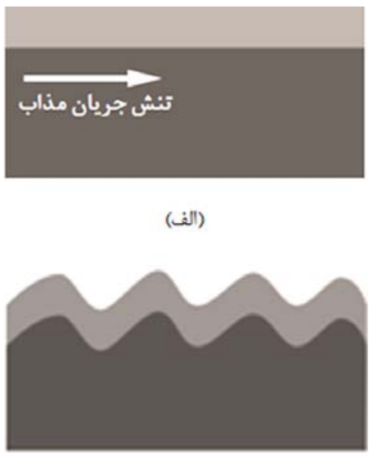
چین‌خوردن لایه‌ی اکسیدی از لحاظ زمانی هم قبل از شروع انجماد و هم پس از آن رخ می‌دهد. چین‌خوردگی‌هایی که قبل از شروع انجماد ایجاد می‌شوند شامل تاخوردگی و چروکیدگی هستند، امّا چین‌خوردگی‌های پس از شروع انجماد تنها از نوع چروکیدگی هستند. تقسیم‌بندی انواع چین‌خوردگی لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه در شکل (٦) نشان داده شده است. باید توجه داشت که ظاهر چروکیدگی ایجاد شده قبل از شروع انجماد با چروکیدگی پس از آن فرق

دارد. این تفاوت در ادامه به‌طور مفصل بررسی خواهد شد.



شکل ٦ دسته‌بندی چین‌خوردگی‌های ایجاد شده در سطح لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه.

الف) چین‌خوردگی‌های ایجاد شده قبل از شروع انجماد: باید توجه داشت که مذاب با لایه‌ی اکسید سطحی خود دارای پیوند اتمی بوده و ترشوندگی مناسبی بین آن‌ها برقرار است. به‌این ترتیب، امکان انتقال تنش‌های ناشی از تلاطم سطحی مذاب به لایه‌ی اکسید سطحی وجود دارد. لایه‌ی اکسیدی برای رهایی از چنین تنش‌هایی مجبور است تا تغییر شکل داده و چین بخورد. این نوع چین‌خوردگی از ارتفاع و ضخامت ظاهری زیادی برخوردار بوده و تاخوردگی نامیده می‌شوند (شکل ۷).



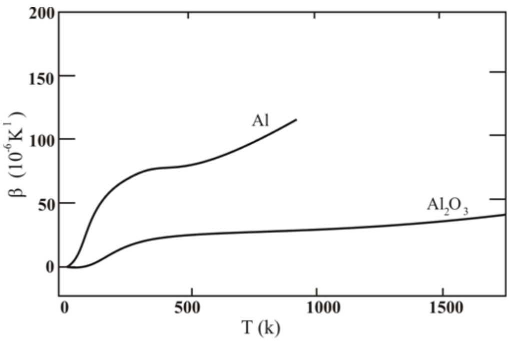
(الف)

(ب)

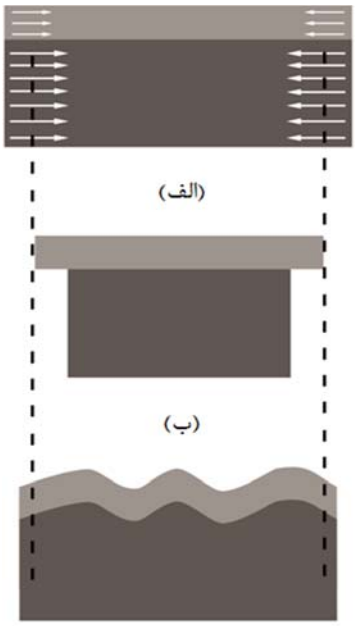
شکل ۷ نمایش تأثیر جهت تنش جریان مذاب بر جهت جریان مذاب (الف)، و تأثیر آن بر چین‌خوردن سطح مذاب و لایه‌ی اکسیدی روی آن (ب).

همان‌گونه که در نمودار شکل (۸) دیده می‌شود، تفاوت زیادی بین ضریب انبساط حجمی مذاب آلومینیم و لایه‌ی اکسید آلومینیم وجود دارد. به‌علّت این تفاوت، تنش انقباضی در محل تماس لایه‌ی اکسیدی و سطح مذاب و در حین سرد شدن مذاب قبل از شروع انجماد به‌وجود آید، و این تنش منجر به چین‌خوردن لایه‌ی اکسیدی می‌شود. این نوع چین‌خوردگی که ضخامت و ارتفاع کم‌تری نسبت به تاخوردگی دارد، چروکیدگی نامیده می‌شود (شکل ۹).

ب) چین‌خوردگی‌های ایجاد شده پس از شروع انجماد و حین رشد هسته‌های جامد: با شروع انجماد و ادامه‌ی سرد شدن مذاب، افزون بر تنش‌های ناشی از تفاوت ضریب انقباض مذاب و لایه‌ی اکسید آلومینیم، لایه‌ی اکسیدی در نتیجه‌ی مکش مذاب به‌سمت هسته‌های جامد و انقباض حین انجماد نیز تحت تنش قرار می‌گیرد. اعمال این تنش‌ها هم‌زمان با رشد دندریتی مذاب منجر به وقوع نوع دیگری از چین‌خوردگی در این لایه می‌شود که نوع آن چروکیدگی خواهد بود. این چروکیدگی‌ها در تصویرهای میکروسکپی معمولاً در اطراف بازوهای دندریتی مشاهده می‌شوند. هر سه نوع چین‌خوردگی فوق‌الذکر در شکل (۱۰) قابل مشاهده‌اند.

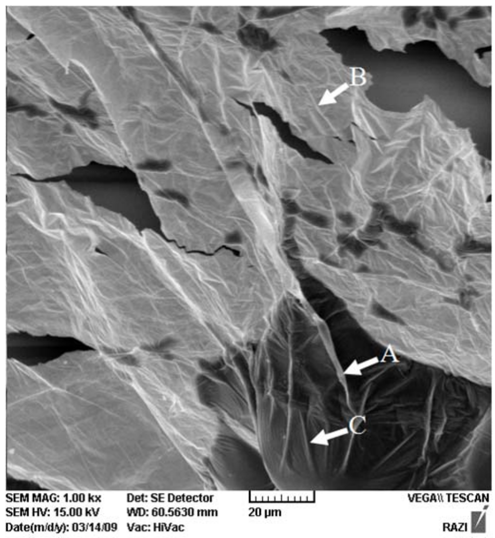


شکل ۸ تغییر ضریب انبساط حجمی آلومینیم و اکسید آلومینیم با دما [7].



(پ)

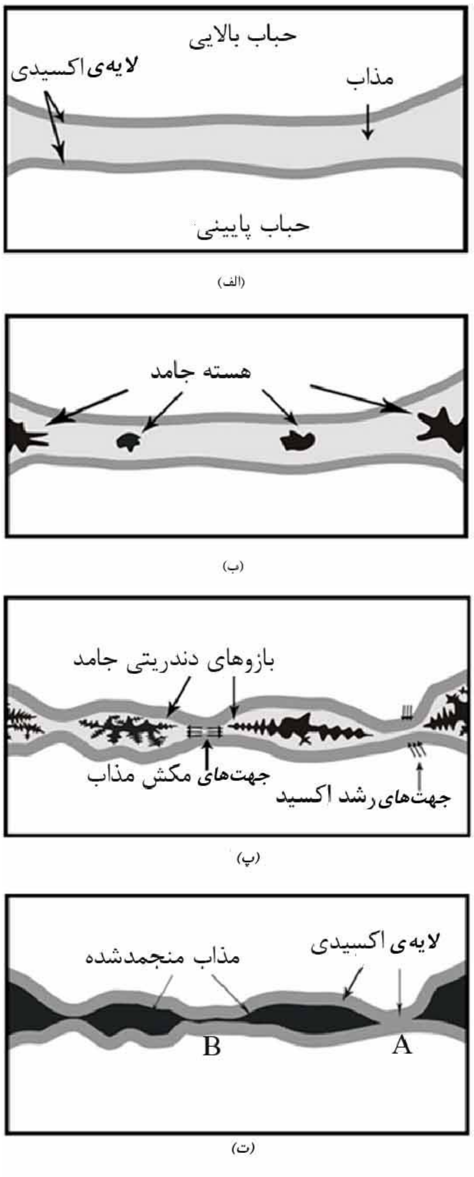
شکل ۹ نمایش اعمال تنش انقباضی کوچک‌تر به لایه‌ی اکسیدی نسبت به مذاب (الف)، انقباض لایه‌ی اکسیدی و مذاب بدون در نظر گرفتن ترشوندگی لایه‌ی اکسیدی و مذاب (ب)، و چین خوردگی لایه‌ی اکسیدی برای رهایی از تنش انقباضی وارده و ایجاد چروکیدگی با در نظر گرفتن ترشوندگی لایه‌ی اکسیدی و مذاب (پ).



شکل ۱۰ انواع چین‌خوردگی‌های لایه‌ی اکسیدی شامل تاخوردگی (A)، چروکیدگی ایجاد شده قبل از شروع انجماد (B)، و چروکیدگی ایجاد شده پس از شروع انجماد (C)

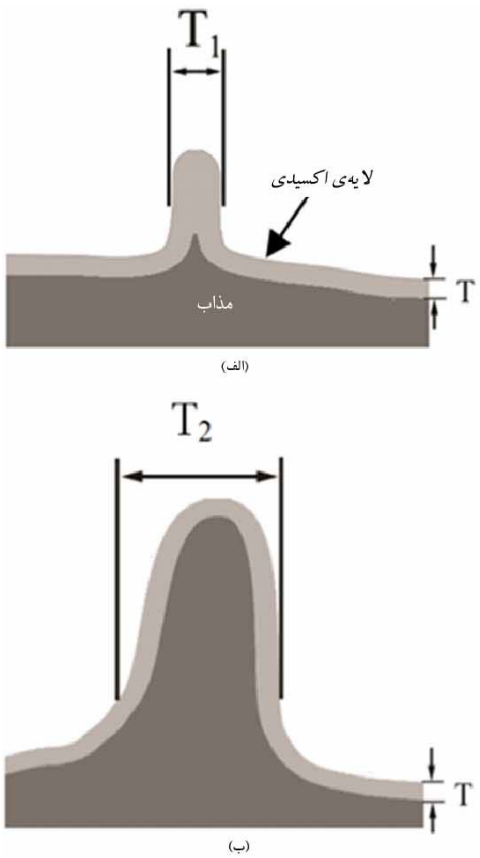
با تشکیل هسته‌های انجمادی در مذاب، مذاب اطراف به‌سمت آن کشیده می‌شود تا به‌این ترتیب فرایند رشد هسته ادامه یابد. در مناطقی که مذاب کم‌تری وجود دارد، مکش مذاب به‌سمت هسته‌های جامد از یک‌سو و افزایش ضخامت لایه‌ی اکسیدی در نتیجه‌ی ادامه‌ی اکسایش از سوی دیگر منجر به کاهش ضخامت لایه‌ی مذاب در میان ساندویچ اکسید- فلز- اکسید و در مناطق دورتری از هسته‌ی انجمادی می‌شود. با توجه به وجود پیوند قوی بین اتمی بین اتم‌های مذاب و اتم‌های اکسید و مذاب آلومینیم، امکان گسسته شدن کامل لایه‌ی مذاب به‌دلیل این پدیده وجود ندارد [13]. بنابراین، لایه‌ی نازکی از مذاب احتمالاً در میان لایه‌های اکسیدی و در مناطقی از ساندویچ اکسید- فلز- اکسید که کمی مذاب دارند باقی می‌ماند. امّا با توجه به رشد لایه‌ی اکسیدی ممکن است بخشی از لایه‌ی نازک مذاب اکسید شود. بنابراین ممکن است مناطقی که در تصویرهای SEM به رنگ روشن دیده می‌شوند یک لایه‌ی اکسیدی خالص، ساندویچ شامل دو لایه‌ی اکسیدی نازک در طرفین و یک لایه‌ی بسیار نازک فلزی در میان آن‌ها یا ترکیبی از این دو باشند (شکل ۱۱). حضور لایه‌ی دوتایی خمیده در ناحیه‌ی G در شکل (٤- ت) می‌تواند دلیلی بر حضور لایه‌ی نازکی از مذاب در میان لایه‌های اکسیدی باشد، زیرا لایه‌ی اکسیدی ماهیّت سرامیکی و ترد داشته و از انعطاف‌پذیری کمی برخوردار است. به‌عبارت دیگر، این طور به‌نظر می‌رسد که لایه‌ی نازک مذاب موجب انعطاف‌پذیری لایه‌ی دوتایی و خمیده شدن آن شده است.

پیش از این، از ضخامت تاخوردگی‌ها برای تخمین ضخامت لایه‌ی اکسیدی دوتایی استفاده شده است[۱۹-14]. با این‌حال، تاخوردگی‌ها معمولاً حاوی مذاب محبوس هستند و ضخامت آن‌ها با مقدار واقعی ضخامت لایه‌ی دوتایی فرق دارد، بنابراین تخمین ضخامت لایه‌ی اکسیدی با استفاده از ضخامت تاخوردگی روش دقیقی نیست (شکل ۱۲). بر این اساس، ضخامت چین‌خوردگی‌ها در نمونه‌های آلومینیم خالص در محدوده‌ی ۰/۲ تا ۱ میکرومتر قرار دارد.



شکل ۱۱ نمایش تشکیل ساندویچ اکسید– فلز– اکسید (الف)، تشکیل هسته‌های انجمادی در مذاب محبوس (ب)، ادامه‌ی انجماد، شروع رشد هسته‌ها و حرکت اتم‌های مایع به‌سمت هسته‌های جامد و تخلیه‌ی نسبی مذاب در فاصله‌ی بین هسته‌های انجمادی (پ)، و اکسایش لایه‌ی بسیار نازک مذاب باقی‌مانده، ایجاد اتصال بین لایه‌های اکسیدی دو طرف و تشکیل یک لایه‌ی اکسیدی واحد (ناحیه‌ی A)، و نیز باقی ماندن لایه‌ی نازک فلزی در میان لایه‌های اکسیدی نزدیک به هم (ناحیه‌ی B) (ت).

یکی از مشخصه‌های لایه‌ی اکسیدی جدید تردی و حساسیت زیاد آن به ترک خوردگی است. تنش‌های مکانیکی در نتیجه‌ی ارتعاشات ناشی از برش قطعه با اره به نمونه وارد می‌شوند. از آنجا که لایه‌ی اکسیدی ماده‌ی سرامیکی نازکی است، بسیار ترد بوده و تحت تأثیر این تنش‌ها می‌شکند. نوع تنش وارده موجب ایجاد اختلاف ارتفاع میان سطوح دو طرف ترک می‌شود. تنش‌های ناشی از ارتعاش قطعه حتی می‌تواند باعث خرد شدن لایه‌ی اکسیدی دوتایی و فرو ریختن آن شوند.



شکل ۱۲ تأثیر ماده‌ی موجود در میان چین‌خوردگی به‌ازای ضخامت یکسانی از لایه‌ی اکسیدی بر روی ضخامت چین‌خوردگی، $T_2 > T_1$.

نتیجه‌گیری

۱- چین‌خوردگی‌های لایه‌های اکسیدی در مذاب آلومینیم خالص در دو مقطع زمانی، قبل از انجماد و حین آن، ایجاد می‌شوند و شامل تاخوردگی و چروکیدگی هستند. تاخوردگی قبل از شروع انجماد تحت تأثیر تنش ناشی از جریان مذاب ایجاد می‌شوند. برخی از چروکیدگی‌ها قبل از شروع انجماد و در نتیجه‌ی تنش انقباضی و برخی از آن‌ها در طول انجماد بر روی نوک دندریت‌ها ایجاد می‌شوند.

۲- کم‌ترین ضخامت چین‌خوردگی در آلومینیم خالص ۲۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. به‌این ترتیب، ضخامت لایه‌ی اکسیدی زمان کوتاه در آلومینیم خالص کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر بود.

۳- نواحی روشن در تصویرهای SEM از نمونه‌های ساندویچ اکسید- فلز- اکسید ممکن است یک لایه‌ی اکسیدی خالص، لایه‌ی دوتایی حاوی یک لایه‌ی نازک فلزی و یا ترکیبی از این‌دو باشند.

مراجع

1. Thiele, W., "Oxidation of melts of Al and of Al alloys", *Aluminum*, 38, pp.707-715, (1962).

2. Cochran, C. N., Belitskus, D. L., and Kinosz, D. L., "Oxidation of aluminum-magnesium melts in air, oxygen, flue gas, and carbon dioxide", *Met. Trans. B,* 8, pp.323-332, (1977).
3. Bergsmark, E., Simensen, C. J., and Kofstad, P., "The oxidation of molten aluminium", *Mat. Sci. and Eng*. A, 120, pp.91-95, (1989).
4. Wightman, G., and Fray, D. J., "The dynamic oxidation of aluminum and its alloys", *Met. Trans.* B, 14, pp.625-631, (1983).
5. Guppy, A., Wickens, A. J., and Fray, D. J., "Oxidation of liquid zinc in carbon dioxide-carbon monoxide mixtures", *Trans. IMM*, 81, pp. 236-242, (1972).
6. Wightman, G., and Fray, D. J., "Dynamic oxidation of zinc and tin and their alloys", *Trans. IMM*, 91, pp.123-128, (1982).
7. Grimvall, G., "*Thermophysical Properties of Materials*", Elsevier Science B.V, (1999).
8. Raiszadeh, R., and Griffiths, W. D., "A method to study the history of a double oxide film defect in liquid aluminum alloys", *Met. and Mat. Trans. B*, 37, pp.865-871, (2006).
9. Green, N. R., and Campbell, J., "Influence of oxide film filling defects on the strength of Al-7Si-Mg alloy casting ", *AFS Trans*, pp.341-347, (1994).
10. Nyahumwa, C., Green, N. R., and Campbell, J., "Effect of mold filling turbulence on fatigue properties of cast aluminum alloys", *AFS Trans*, pp.215-223, (1998).
11. Nyahumwa, C., Green, N. R., and Campbell, J.,"Influence of casting technique and hot isostatic pressing on the fatigue of an Al-7Si-Mg alloy", *Met. and Mat. Trans*. A, 32, pp.349-358, (2001).
12. Campbell, J., "*Castings*", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, (2003).
13. Campbell, J., "Entrainment defects", *Mat. Sci. and Tech*, 22, pp.127-145, (2006).
14. Divandari, M., and Campbell, J., "A new technique for the study of aluminum oxide films", *Aluminum Trans*, 2, pp.233-238, (2000).
15. Divandari, M., and Campbell, J., "Morphology of oxide films of Al-5Mg alloy in dynamic conditions in casting", *Int. J. of Cast Met. Res*, 18, pp.1-6, (2005).
16. Divandari, M., and Campbell, J., "Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting", *Int. J. of Cast Met. Res*, 17, pp.1-6, (2004).
17. Mirak, A. R., Divandari, M., Boutorabi, S. M. A., Campbell, J., "Oxide film characteristics of AZ91 magnesium alloy in casting conditions", *Int. J. of Cast Met. Res*, 20, pp.215-220, (2007).

۱۸. آذرمهر، سید امیر.، دیواندری، مهدی.، عربی، حسین و نایبی، بهزاد، "تاثیر میزان منیزیم روی خصوصیات فیلمهای اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم-منیزیم"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، شماره ۹۴، ص ۱۱-۲۱، (۱۳۸۸).

۱۹. نایبی، بهزاد.، دیواندری، مهدی و نعیمی‌جمال، محمدرضا، "بررسی خصوصیات(ضخامت و مورفولوژی)فیلم‌های اکسیدی تشکیل-شده در مذاب آلومینیم خالص"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، شماره ۹۲، ص۱۲-۱۹، (۱۳۸۸)